

⑮ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ Patentschrift
⑩ DE 197 43 296 C 1

⑳ Aktenzeichen: 197 43 296.4-16
㉑ Anmeldetag: 30. 9. 97
㉒ Offenlegungstag: -
㉓ Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 12. 11. 98

⑤ Int. Cl.⁶:
B 32 B 1/10
G 02 B 6/12
C 23 F 1/02
C 30 B 25/02
C 30 B 31/06
C 30 B 33/10
B 32 B 31/10

DE 197 43 296 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦③ Patentinhaber:
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦② Erfinder:
Grüning, Ulrike, Dipl.-Phys., 80796 München, DE;
Wendt, Hermann, Dr.rer.nat., 85630 Grasbrunn, DE;
Lehmann, Volker, Dipl.-Ing. Dr., 80689 München,
DE; Stengl, Reinhard, Dipl.-Phys., 86391
Stadtbergen, DE; Reisinger, Hans, Dipl.-Phys.,
82031 Grünwald, DE

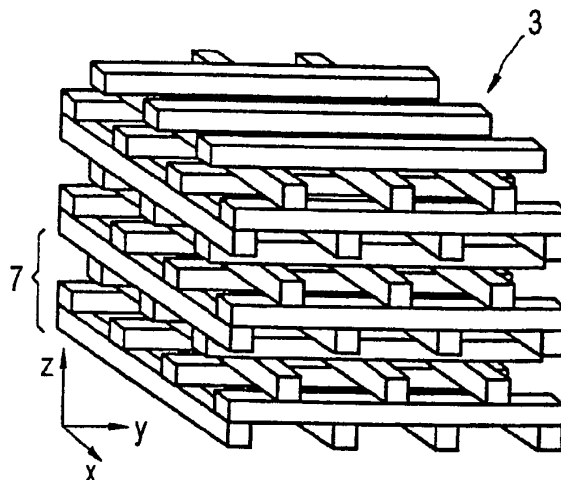
⑤⑥ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

WO 97 04 340 A1

Photonic Band Gaps and Localization, ed. C.M.Sou-
koulis, Plenum Press, New York, 1993, S.207-234;
Journal of Applied Physics, Bd.75, 1994, S.4753;

⑤④ Verfahren zur Herstellung einer offenen Form

⑤⑦ Die Erfindung betrifft die Herstellung einer aus mehreren jeweils zweidimensional strukturierten Schichten (1, 2) zusammengesetzten, offenen Form (3) aus dem bestimmten Werkstoff. Dazu wird eine erste Schicht (1) aus einem Werkstoff bereitgestellt, und es wird ein zu der Form (3) gehöriges Teil (3) der ersten Schicht (1) durch Dotieren zumindest einer Zone (3, 4) der ersten Schicht (1) markiert. Dann wird zumindest eine weitere Schicht (2) aus dem Werkstoff aufgebracht, und auch darin wird ein zu der Form (3) gehöriges Teil (3) markiert. Schließlich wird jedes nicht markierte Teil (4) der Schichten (1, 2) durch Ätzen in Abhängigkeit von der jeweiligen Dotierung jeder Schicht (1, 2) entfernt. Die offene Form (3) ist insbesondere ein photonischer Kristall.



DE 197 43 296 C 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer aus mehreren, jeweils zweidimensional strukturierten Schichten zusammengesetzten, offenen Form aus einem Werkstoff, welcher in Abhängigkeit von einer Dotierung ätzbar ist.

Die Erfindung bezieht sich insbesondere auf die Herstellung einer offenen Form, welche als "photonischer Kristall" geeignet ist.

Unter einer offenen Form wird im vorliegenden Zusammenhang eine Form mit nicht-konvexer Geometrie verstanden. Eine offene Form kann insbesondere eine nicht einfach zusammenhängende Geometrie im Sinne der herkömmlichen Topologie haben, also mit einem Loch, einem in zwei Dimensionen begrenzten Kanal, mehreren Löchern oder dergleichen versehen sein.

Eine solche offene Form kann unter Umständen als photonischer Kristall fungieren, also als mehr oder weniger periodische, sozusagen kristalline Struktur, welche sich hinsichtlich der Transmission von Photonen, also Licht, verhält wie ein im herkömmlichen Sinne kristalliner Halbleiter hinsichtlich der Transmission von Elektronen. Ein photonischer Kristall kann unter Umständen eine "photonische Bandlücke" aufweisen in Analogie zu einem Halbleiter mit einer "elektronischen Bandlücke"; dies bedeutet, daß der photonische Kristall undurchlässig ist für ein Photon mit einer Energie innerhalb der photonischen Bandlücke. Dies bedeutet, daß der photonische Kristall für ein solches Photon, wenn es von außen auf ihn fällt, als im wesentlichen perfekter Spiegel wirkt. Aus dieser Eigenschaft erklärt sich das Interesse an photonischen Kristallen zur Begrenzung optischer Lichtleiter oder optischer Hohlraumresonatoren, denn anders als eine üblicherweise verwendete Begrenzung eines optischen Wellenleiters oder Hohlraumresonators mittels einer total reflektierenden Anordnung ist die reflektierende Eigenschaft eines photonischen Kristalls unabhängig von einem Winkel, unter dem ein zu reflektierendes Photon auf den photonischen Kristall auftrifft.

Eine als photonischer Kristall ausgebildete offene Form sowie ein Verfahren zu ihrer Herstellung gehen hervor aus der Schrift WO 97/04340 A1. Die offene Form besteht aus Silizium als Werkstoff und wird hergestellt mittels elektrochemischen Ätzens. Die WO 97/04340 A1 erwähnt auch Galliumarsenid und Aluminium-Gallium-Arsenid als geeignete Werkstoffe; in einem solchen Werkstoff kann die gewünschte offene Struktur durch reaktives Ionenätzen hergestellt werden.

Ein breiter Überblick über das technische Gebiet der photonischen Kristalle bietet der Aufsatz "Photonic Band Structure" von E. Yablonovitch, enthalten in dem von C. M. Soukoulis herausgegebenen Buch "Photonic Band Gaps and Localization", Plenum Press, New York, N. Y., 1993, Seiten 207-234. Ein Beispiel für einen photonischen Kristall findet sich auf Seite 222 dieses Aufsatzes, Fig. 15. Die Figur enthält auch Hinweise zur Herstellung dieses photonischen Kristalls.

Von Interesse im vorliegenden Zusammenhang ist auch ein Aufsatz von R. D. Meade et al., "Novel Applications of Photonic Band Gap Materials: Low-loss Bends and High Q Cavities", Journal of Applied Physics 75 (1994) 4753. Dieser Aufsatz zeigt Hohlraumresonatoren und Wellenleiter, die von photonischen Kristallen begrenzt sind.

Ein photonischer Kristall erfordert herkömmlich eine vergleichsweise komplex aufgebaute offene Form. Zusätzlich ist es erwünscht, eine solche offene Form herzustellen aus einem Material, wie es für elektronische Halbleiterbauelemente Verwendung findet, und somit eine Integration der

Technologie der photonischen Kristalle mit der Technologie der Halbleiter-Optoelektronik zu ermöglichen.

Dementsprechend ist die Aufgabe der Erfindung die Angabe eines Verfahrens zur Herstellung einer offenen Form, die aus mehreren, jeweils zweidimensional strukturierten Schichten zusammensetzbar ist und aus einem Werkstoff, welcher in Abhängigkeit von einer Dotierung ätzbar ist, besteht.

Zur Lösung dieser Aufgabe angegeben wird ein Verfahren gemäß dem unabhängigen Patentanspruch. Bevorzugte Weiterbildungen des Verfahrens ergeben sich aus den abhängigen Patentansprüchen.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Herstellung einer aus mehreren, jeweils zweidimensional strukturierten Schichten zusammengesetzten, offenen Form aus einem Werkstoff, welcher in Abhängigkeit von einer Dotierung ätzbar ist, umfaßt folgende Schritte:

- Bereitstellen einer ersten Schicht, welche aus dem Werkstoff besteht, und Markieren eines zu der Form gehörigen Teils der ersten Schicht durch Dotieren zumindest einer Zone der ersten Schicht;
- zumindest einmal Aufbringen einer weiteren Schicht, welche aus dem Werkstoff besteht, und Markieren eines zu der Form gehörigen Teils der weiteren Schicht durch Dotieren zumindest einer Zone der weiteren Schicht; und
- Entfernen jedes nicht markierten Teils der Schichten durch Ätzen in Abhängigkeit von der jeweiligen Dotierung jeder Schicht.

Die herzustellende offene Form ist so strukturiert, daß sie aus jeweils zweidimensional strukturierten Schichten zusammengesetzt werden kann. Eine Strukturierung einer Schicht wird dann als zweidimensional befunden, wenn sie entlang einer Dickenrichtung der Schicht homogen ist; es handelt sich also bei der Struktur um eine im wesentlichen ebene Struktur. Durch entsprechendes Dotieren jeder Schicht wird jedes zu der Form gehörige Teil der Schicht markiert und dadurch vorbereitet für den Ätzprozeß, welcher die herzustellende offene Form aus dem bis auf die Dotierung homogenen Komplex der Schichten herauslöst. Mittels der Dotierungen kann wahlweise das Ätzen des Werkstoffes erleichtert (dann entsteht die offene Form aus dem undotiert verbliebenen Werkstoff) oder erschwert (dann entsteht die offene Form aus dem dotierten Werkstoff) werden. Es bestehen auch keine grundsätzlichen Einschränkungen hinsichtlich des Aufbringens der zumindest einen weiteren Schicht auf die erste Schicht. Eine weitere Schicht kann sowohl aufgewachsen, also durch Phasenumwandlung direkt auf dem bereits vorliegenden Substrat erzeugt, oder als zunächst separater Festkörper, gegebenenfalls schon mit der gewünschten Dotierung, hergestellt und durch nachträgliches "Wafer Bonding" mit dem bereits vorliegenden Substrat verbunden werden. Ätzverfahren verschiedenster Art, die ein selektives Ätzen eines Werkstoffes in Abhängigkeit von einer Dotierung erlauben, sind auf dem Gebiet der Technologie der elektronischen Halbleiter geläufig; im Einzelfall muß ein dem gewählten Werkstoff und der gewählten Dotierung entsprechendes Ätzverfahren herangezogen werden.

Das Aufbringen einer weiteren Schicht erfolgt vorzugsweise durch Aufwachsen; dabei wird weiterhin vorzugsweise die erste Schicht als Einkristall bereitgestellt und jede weitere Schicht epitaktisch, also unter Fortsetzung der einkristallinen Struktur, aufgewachsen.

Der Werkstoff der offenen Form ist vorzugsweise ein Halbleiter, insbesondere Silizium. In diesem Fall kann das Dotieren unter Erzeugung einer p-Leitfähigkeit in dem Sili-

zium erfolgen, besonders vorzugsweise durch Einbringen von Bor. Zusätzlich vorzugsweise wird bei jedem Dotieren eine Konzentration von dotierenden Atomen, insbesondere also Bor, oberhalb von 10^{15} pro cm^3 , vorzugsweise oberhalb von 10^{20} pro cm^3 , in dem Werkstoff erzeugt. Das Ätzen kann dann durch eine alkalische Ätzflüssigkeit erfolgen; ein diesbezügliches Ausführungsbeispiel wird noch erläutert. In diesem Zusammenhang erfolgt außerdem vorzugsweise das Markieren jedes erwähnten Teils der offenen Form durch Dotieren dieses Teils, da p-leitfähig dotiertes Silizium mittels einer alkalischen Ätzflüssigkeit üblicherweise wesentlich weniger aufgelöst wird als undotiertes Silizium.

Bei dem Verfahren wird vorzugsweise eine offene Form mit einer sich höchstens viermal periodisch wiederholenden Struktur erzeugt. Dies ist von besonderer Bedeutung dann, wenn die herzustellende offene Form ein photonischer Kristall ist, denn die Funktion eines photonischen Kristalls kann in Mitteleidenschaft gezogen werden, wenn sich die herstellungsbedingten Abmessungstoleranzen einer zu oft wiederholten Struktur zu stark bemerkbar machen.

Eine bevorzugte Weiterbildung des Verfahrens sieht vor, daß jedes Dotieren erfolgt mittels eines in der Technologie der elektronischen Halbleiterbauelemente geläufigen Maskierungsverfahrens. Dabei wird vor jedem Dotieren eine die entsprechende Schicht außerhalb jeder zu dotierenden Zone bedeckende Maske aufgebracht, dann die gewünschte Dotierung vorgenommen und direkt nach dem Dotieren die Maske wieder entfernt.

Die herzustellende Form ist vorzugsweise ein photonischer Kristall, wie bereits erläutert.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird nachfolgend anhand der Zeichnung erläutert. Die Zeichnung ist zur Verdeutlichung bestimmter Merkmale keine maßstabsgetreue Wiedergabe des Ausführungsbeispiels.

Im einzelnen zeigen:

Fig. 1 eine wie vorstehend erläutert hergestellte offene Form, die als photonischer Kristall geeignet ist; und die **Fig. 2 bis 5** die Herstellung dieser offenen Form.

Fig. 1 zeigt die herzustellende und einen photonischen Kristall darstellende offene Form **3** in einer Schrägansicht. Diese offene Form **3** ist anzusehen als eine Schichtung ebener Anordnungen von Balken und dementsprechend in klar erkennbarer Weise in jeweils zweidimensional strukturierte Schichten, die entlang der z-Achse des dargestellten Koordinatensystems aufeinanderliegen, zerlegbar. Zu erkennen ist auch, daß die offene Form eine periodisch wiederkehrende Struktur **7**, welche aus vier unmittelbar aufeinanderfolgenden Schichten besteht, aufweist. Es sei bemerkt, daß die dargestellte Periodizität der offenen Form **3** keine notwendige Voraussetzung ist, denn gerade durch vereinzelte oder fortgesetzte Brüche der Periodizität können in der offenen Form **3** wellenleitende Strukturen nach Art eines Wellenleiters oder optischen Hohlraumresonators realisiert werden. Die offene Form **3** ist so bemessen, daß sie die beabsichtigte Funktion als photonischer Kristall für Photonen als dem infraroten Spektralbereich erfüllt.

Am Beispiel der Herstellung einer einzigen Struktur **7**, die sich in der offenen Form **3** wie erwähnt periodisch wiederholt, wird nun das erfindungsgemäße Verfahren anhand der **Fig. 2 bis 5** erläutert.

Gemäß **Fig. 2** wird ausgegangen von einem einkristallinen, nicht dotierten Substrat **6** aus Silizium. Auf diesem Substrat **6** wird zunächst durch epitaxiales Aufwachsen die erste Schicht **1** erzeugt, wiederum aus zunächst undotiertem Silizium. Auf die erste Schicht **1** wird in herkömmlicher Weise eine strukturierte Maske **5** aufgebracht, und unter Zuhilfenahme dieser Maske **5** werden diejenigen Teile **3** der ersten Schicht **1**, welche zu der herzustellenden offenen Form

gehören, unter Bildung einer p-Leitfähigkeit mit Bor dotiert. Diese Dotierung erfolgt unter Einhaltung der vorstehend als bevorzugt bezeichneten Kriterien. Von der Maske **5** bedeckte Zonen **4** der ersten Schicht **1** verbleiben ohne Dotierung. Anschließend wird die Maske **5** entfernt, und auf die erste Schicht **1** wird eine ebenfalls aus zunächst undotiertem Silizium bestehende weitere Schicht **2** aufgewachsen, wiederum epitaxial zur Erhaltung und Fortsetzung der ursprünglich vorhandenen einkristallinen Struktur. Auf die weitere Schicht **2** wird wiederum eine strukturierte Maske **5** aufgebracht, wie dargestellt in **Fig. 3**. Diese Maske **5** läßt eine einzige sichtbare zu dotierende Zone **3** frei; undotiert verbleibende Zonen **4** befinden sich lediglich an den Rändern der weiteren Schicht **2**. Nach Dotierung der weiteren Schicht **2** wird die Maske **5** entfernt und erneut eine weitere Schicht **2** aufgewachsen sowie mit einer neuen strukturierten Maske **5** versehen, siehe **Fig. 4**. Nach Dotierung der Schicht **2** und Entfernung der Maske **5** wird noch eine weitere Schicht **2** aufgewachsen und noch eine neue Maske **5** aufgebracht, siehe **Fig. 5**. Wie aus **Fig. 1** für die entsprechende Schicht offenen Form **3** frei erkennbar, bedeckt in der Ansicht gemäß **Fig. 5** die Maske **5** die obere weitere Schicht **2** vollständig; mithin bleibt diese Schicht **2** an der dargestellten Stelle vollständig undotiert.

Nach Entfernung der in **Fig. 5** dargestellten Maske **5** ist die sich in der gewünschten offenen Form **3** periodisch wiederholende Struktur **7** vollständig hergestellt, freilich nur als komplex zusammenhängende dotierte Matrix in einem ansonsten undotierten, aus Silizium bestehenden einfach zusammenhängenden Monolithen. Durch Wiederholen der aus den **Fig. 2 bis 5** erkennbaren Abfolge von Prozessschritten kann die Struktur **7** erneut realisiert werden, und dies in jedweder gewünschten Anzahl. Wie bereits erläutert wird es bevorzugt, die Anzahl der Wiederholungen nicht zu groß zu wählen; mehr als fünf Wiederholungen können unter Umständen die Funktion der offenen Form **3** durch sich dann zu stark auswirkende Fertigungstoleranzen beeinträchtigen. Entsprechend zeigt **Fig. 1** nur drei übereinander angeordnete Strukturen **7**.

Sind alle gewünschten weiteren Schichten **2** aufgebracht und wie gewünscht dotiert, erfolgt als letzter Prozessschritt das Herauslösen der offenen Form **3** aus dem zunächst erhaltenen Monolithen. Dazu wird der Monolith in aus der Technologie der Halbleiterelektronik geläufiger Weise durch Ätzen mit einer alkalischen Ätzflüssigkeit geätzt, wobei die Ätzflüssigkeit als wirksame Bestandteile Ethylendiamin und Pyrokatechol enthält. Eine solche Ätzflüssigkeit zeigt bekanntermaßen eine deutliche Variation der Ätzung von mit Bor dotiertem Silizium, sofern die Dotierung eine Konzentration von Dotierungsatomen oberhalb von 10^{15} pro cm^3 aufweist. Der Unterschied in den Ätzraten zwischen mit Bor dotiertem Silizium mit einer Dotierung von mehr als 10^{20} pro cm^3 und mit Bor dotiertem Silizium mit einer Dotierung von weniger 10^{19} pro cm^3 kann einen Faktor von 1000 erreichen. Somit steht ein hervorragendes Verfahren zur Verfügung, mit dem undotiertes Silizium ohne wesentlichen Angriff auf dotiertes Silizium aus dem Monolithen herausgelöst werden kann. Somit kann alles undotierte Silizium aus der dotierten Matrix entfernt werden, und nach Vollendung des Ätzens liegt allein noch die dotierte Matrix, und dies ist die gewünschte offene Form **3** aufgebaut aus dotiertem Silizium, vor.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung einer aus mehreren, jeweils zweidimensional strukturierten Schichten (**1, 2**) zusammengesetzten, offenen Form (**3**) aus einem

Werkstoff, welcher in Abhängigkeit von einer Dotierung ätzbar ist, umfassend folgende Schritte:

- Bereitstellen einer ersten Schicht (1), welche aus dem Werkstoff besteht, und Markieren eines zu der Form (3) gehörigen Teils (3) der ersten Schicht (1) durch Dotieren zumindest einer Zone (3, 4) der ersten Schicht; 5
 - zumindest einmal Aufbringen einer weiteren Schicht (2), welche aus dem Werkstoff besteht, und Markieren eines zu der Form (3) gehörigen Teils (3) der weiteren Schicht (2) durch Dotieren zumindest einer Zone (3, 4) der weiteren Schicht (2); und 10
 - Entfernen jedes nicht markierten Teils (4) der Schichten (1, 2) durch Ätzen in Abhängigkeit von der jeweiligen Dotierung jeder Schicht (1, 2). 15
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das Aufbringen erfolgt durch Aufwachsen.
 3. Verfahren nach Anspruch 2, bei dem die erste Schicht (1) als Einkristall bereitgestellt und jede weitere Schicht (2) epitaktisch aufgewachsen wird. 20
 4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Werkstoff ein Halbleiter ist.
 5. Verfahren nach Anspruch 4, bei dem der Werkstoff Silizium ist. 25
 6. Verfahren nach Anspruch 5, bei dem jedes Dotieren eine p-Leitfähigkeit in dem Werkstoff erzeugt.
 7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem jedes Dotieren durch Einbringen von Bor erfolgt.
 8. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 und 7, bei dem mit jedem Dotieren eine Konzentration von dotierenden Atomen oberhalb von 10^{15} pro cm^3 , vorzugsweise oberhalb von 10^{20} pro cm^3 , in dem Werkstoff erzeugt wird. 30
 9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8, bei dem das Ätzen durch eine alkalische Ätzflüssigkeit erfolgt. 35
 10. Verfahren nach Anspruch 9, bei dem das Markieren jedes Teils (3) durch Dotieren dieses Teils (3) erfolgt. 40
 11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die offene Form (3) mit einer sich höchstens viermal periodisch wiederholenden Struktur (7) hergestellt wird.
 12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem vor jedem Dotieren eine die entsprechende Schicht (1, 2) außerhalb jeder Zone (3, 4) bedeckende Maske (5) aufgebracht und direkt nach diesem Dotieren wieder entfernt wird. 45
 13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die herzustellende Form (3) ein photonischer Kristall (3) ist. 50

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

55

60

65

FIG 2

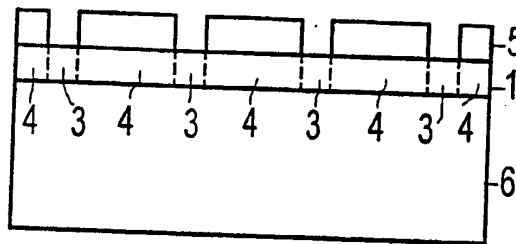


FIG 3

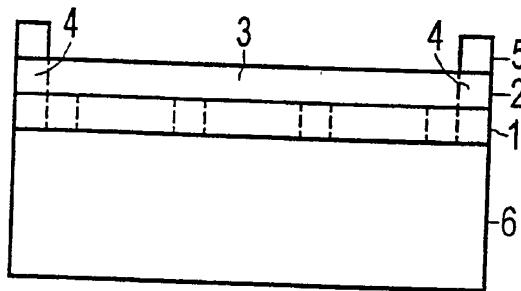


FIG 4

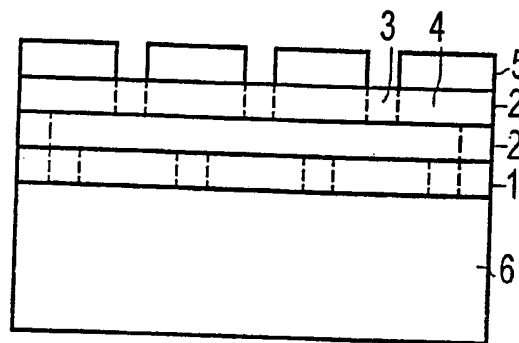


FIG 5

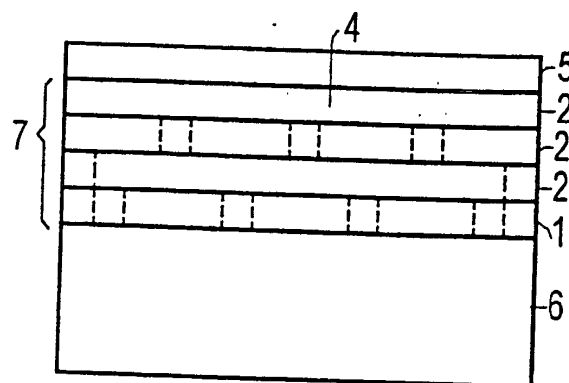


FIG 1

